

**Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo**

**Itamar Vandelli**

**Proposta de aprimoramento de um sistema de adsorção para  
produção combinada de aquecimento de água e refrigeração com  
uso de energia solar**

**São Paulo  
2010**

Itamar Vandelli

Proposta de aprimoramento de um sistema de adsorção para produção combinada de aquecimento de água e refrigeração com uso de energia solar

Itamar Vandelli

Proposta de aprimoramento de um sistema de adsorção para produção combinada de aquecimento de água e refrigeração com uso de energia solar

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Processos Industriais

Data da aprovação \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

---

Prof. Dr. Marco Antonio Soares de Paiva  
(Orientador)  
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Membros da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marco Antonio Soares de Paiva (Orientador)  
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Prof. Dr. Roberto de Aguiar Peixoto  
EEM – Escola de Engenharia Mauá

Prof. Dr. Efraim Cekinski  
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Itamar Vandelli

Proposta de aprimoramento de um sistema de adsorção para produção combinada de aquecimento de água e refrigeração com uso de energia solar

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Processos Industriais

Área de Concentração: Desenvolvimento e Otimização de Processos Industriais

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Soares de Paiva

São Paulo  
Março/2010

Ficha Catalográfica  
Elaborada pelo Departamento de Acervo e Informação Tecnológica – DAIT  
do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT

V226p

Vandelli, Itamar

Proposta de aprimoramento de um sistema de adsorção para produção combinada de aquecimento de água e refrigeração com uso de energia solar. / Itamar Vandelli. São Paulo, 2010.

141p.; + 1 cd-rom

Dissertação (Mestrado em Processos Industriais) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Área de concentração: Desenvolvimento e Otimização de Processos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Marco A. Soares de Paiva

1. Aquecimento de água 2. Refrigeração por adsorção 3. Energia solar 4. Habitação 5. Tese I. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Coordenadoria de Ensino Tecnológico II. Título

10-19

CDU 697.329(043)

## **Dedicatória**

**À Roseli...**

*"Florebo Quocumque Ferar"*

## **Agradecimentos**

Primeiramente ao Prof. Dr. Marco Antonio Soares de Paiva pela paciência e dedicação em me orientar de forma positiva de maneira a permitir que este trabalho tivesse a coerência teórica necessária.

À professora do Instituto de Pesquisas Tecnológicas Edna Gubitoso e a Ester Baptista dos Santos pela formatação do texto conforme as normas do IPT bem como pela editoração competente que tornaram o conteúdo da dissertação inteligível.

À minha esposa Roseli, minha sogra Dona Marlene e meus cunhados Paulo e Ana pelo apoio.

## RESUMO

Este trabalho analisa um sistema híbrido para a produção de água quente sanitária e resfriamento do compartimento de um refrigerador utilizando um ciclo de refrigeração por adsorção a ser empregado em unidades residenciais, comerciais ou industriais tendo como fonte primária a energia solar. O foco é a aplicação em unidades residenciais de pequeno porte onde há a necessidade de água quente para banho doméstico e de refrigeração para a conservação de alimentos e/ou produção de gelo.

O trabalho está dividido em cinco capítulos que vão desde a visão mais abrangente das tecnologias disponíveis para a refrigeração solar até a descrição do funcionamento de um sistema híbrido. Primeiramente é apresentado um resumo dos principais ciclos de refrigeração que operam utilizando a luz solar como fonte de energia mostrando as várias opções de tecnologias existentes e descrevendo para cada uma delas os princípios de funcionamento dos refrigeradores. Em seguida são descritos os dois tipos básicos de conversores de energia solar, ou seja, a célula fotovoltaica e o coletor solar térmico mostrando as vantagens e desvantagens de cada um bem como suas aplicações. Quanto ao coletor solar térmico, enfoca-se principalmente o de placas planas, mostrando sua conveniência ao propósito deste trabalho. Apresenta-se um histórico do desenvolvimento dos sistemas de refrigeração que operam utilizando um ciclo adsorativo, mostrando os diversos tipos de máquinas existentes, as técnicas de recuperação energética e de transferência de massa, bem como as inovações introduzidas nos leitos de adsorventes.

Quanto ao assunto de materiais e substâncias mais convenientes, são descritos os desenvolvimentos de adsorventes/adsorvatos bem como as possibilidades de aplicação da refrigeração por adsorção empregando a energia solar. É feita a descrição detalhada do trabalho de desenvolvimento de um sistema híbrido de aquecimento de água e produção de refrigeração realizado no *Institute of Refrigeration and Cryogenics* da Universidade Shanghai Jiao Tong na China, onde experimentos práticos foram conduzidos. São quantificados os resultados de aquecimento e refrigeração obtidos, bem como sua correlação com as diversas variáveis envolvidas no processo.

O foco do presente trabalho é adaptar o sistema original proposto pelos pesquisadores chineses de forma a permitir a sua utilização pelas famílias urbanas brasileiras, seguindo as determinações da lei solar da cidade de São Paulo, bem como avaliar a viabilidade de introdução de algumas modificações. A primeira delas é a recuperação de energia térmica no condensador para melhorar a eficiência do sistema. A outra avaliação trata da substituição do adsorvato original por outro de fibra de carvão ativado em tecido (FCA). Finalmente será avaliada a possibilidade de introduzir melhorias no sistema de transferência de massa do sistema de adsorção, visando à redução do período de tempo do ciclo. Com essas análises, foram obtidos parâmetros preliminares de projeto que podem permitir o desenvolvimento de um sistema híbrido de aquecimento e refrigeração à energia solar adaptado à situação brasileira.

Palavras-chave: energia solar; refrigeração por adsorção; refrigeração solar; aquecedor de água; sistema híbrido de aquecimento e refrigeração por energia solar.



## ABSTRACT

### **Investigation of the feasibility for the use of solar energy on a combined production of water heating and refrigeration by means of an adsorption cycle**

This work analyzes an hybrid system for the production of sanitary hot water and cooling of a refrigerator box by means of an adsorption refrigeration cycle to be used in residential, industrial and commercial units using solar energy as primary energy source. We shall focus on small size residential units where there is the necessity of hot water for domestic purposes and refrigeration for food preservation and/or ice production.

This work is divided into 5 chapters comprehending since the overview of the available solar energy cooling technologies until the description of the hybrid system. Firstly it is presented an overview of the main cooling systems using solar energy as primary energy source showing the various options of existing technologies and describing for each of them the working principles of the refrigerators.

Then it is described the two basic types of solar energy converters, i.e. the photovoltaic solar cell and the solar collector panel, showing the advantages and disadvantages for each of them as well as their main applications. Regarding the solar collector, it is focused principally on the flat plate type showing its convenience for the purpose of this work. It is presented an historical view of the adsorption refrigeration systems developments showing the various types of existing machines, heat and mass recovering techniques as well as the innovations in the adsorbent beds.

In the materials area, it is described de developments of adsorbents and adsorbates as well as the possibilities of application for the adsorption cooling using solar energy. It is made the detailed description of the development work realized at the Institute of Refrigeration and Criogenics of the Shangai Jiao Tong University in China where practical experiments were realized. The heating and cooling effects are shown as well as their correlation with the variables involved in the process.

The focal point of this work, is to adapt the original system proposed by the chinese researchers to allow its use by urban brazilian families following the determinations of the solar law of São Paulo city, as well as to evaluate the feasibility of some modifications to be introduced: first it will be demonstrated the advantages of condenser heat recovering to improve system efficiency. Next it will be evaluated the possibility of using activated carbon fiber (ACF) to substitute the original adsorbate activated carbon. Finally it will be made a proposal to improve the mass transfer system to allow cycle time reduction. With these analyses preliminary design parameters were obtained which will allow the development of an hybrid heating and cooling system using solar energy for application to a practical brazilian system.

Keywords: solar energy; adsorption refrigeration; solar refrigeration; water heater; solar energy heating and cooling hybrid system.

## Lista de Ilustrações

Figura 1 –	Uso final da energia elétrica no setor residencial	16
Figura 2 –	Resumo das possibilidades de utilização da energia solar	18
Figura 3 –	Instalação de sistemas de aquecimento solar de água	19
Figura 4 –	Detalhes da instalação de sistemas de aquecimento solar de água	19
Figura 5 –	Fontes alternativas de energia térmica e possíveis aplicações	22
Figura 6 –	Princípio de funcionamento de um refrigerador Peltier	24
Figura 7 –	Opções tecnológicas de refrigeração solar	28
Figura 8 –	Coletor solar de placas planas	30
Figura 9 –	Interações térmicas que ocorrem em um coletor solar de placas planas	31
Figura 10 –	Coletor solar plano de tubos evacuados	32
Figura 11 –	Detalhe do Coletor solar plano de tubos evacuados	32
Figura 12 –	Detalhe do tubo de vacuo	32
Figura 13 –	Outro modelo de coletor solar de tubosevacuados	33
Figura 14 –	Detalhe do tubo de calor	33
Figura 15 –	Esquema de funcionamento de um CPC - coletor solar parabólico concentrador composto e de um PTC- coletor solar concentrador tipo calha parabólica.	34
Figura 16 –	Divisão dos ciclos de sorção	38
Figura 17 –	Esquema dos ciclos de absorção líquida (a) e sólida (b)	39
Figura 18 –	Esquema do ciclos de absorção intermitente (a) e contínuo de simples efeito (b)	40
Figura 19 –	Esquema de funcionamento do ciclo de um refrigerador por adsorção utilizando energia solar	44
Figura 20 –	Ciclo termodinâmico ideal de um ciclo térmico por adsorção	45
Figura 21 –	Esquema de um refrigerador solar por adsorção intermitente com adsorvedor integrado ao coletor	45
Figura 22 –	Fotografia e esquema de um refrigerador solar por adsorção.	46
Figura 23 –	Adsorvedor tubular com cobertura de vidro sob vácuo (Hong Kong). Temperatura máxima nos tubos: 130°C a 135°C e eficiência térmica do coletor-adsorvedor de 30 a 40%.	47

Figura 24 –	Maquina de gelo "no valve" de carvão ativado-metanol desenvolvida em Xangai, China. Produção média de gelo: 4Kg/m <sup>2</sup> dia.	48
Figura 25 –	Maquina de carvão ativado-metanol para fabricação de gelo do LES/UFPB (Universidade Federal da Paraíba). Capacidade de produção: 6,05 kg/m <sup>2</sup> dia à temperatura de -2°C.	48
Figura 26 –	Ciclo do sistema de adsorção sólida contínuo para aquecimento e resfriamento.	49
Figura 27 –	Diagrama esquemático de um sistema de aquecimento e refrigeração por adsorção.	53
Figura 28 –	Arranjo físico do sistema solar de aquecimento e refrigeração por adsorção.	54
Figura 29 –	Perfil de irradiação solar na Tailândia	55
Figura 30 –	Temperatura do carvão ativado em função da temperatura da fonte auxiliar.	56
Figura 31 –	Perfil de energia de insolação no coletor/adsorvedor solar.	56
Figura 32 –	Aquecimento da água de circulação no sistema híbrido de aquecimento e refrigeração.	57
Figura 33 –	Esquema do sistema híbrido de aquecimento e refrigeração solar utilizando adsorção sólida.	58
Figura 34 –	Diagrama p-T-x para um sistema ideal combinado de aquecimento e refrigeração com recuperação de calor.	64
Figura 35 –	Protótipo de sistema de produção de água quente e refrigeração com a utilização de adsorção sólida.	75
Figura 36 –	Arranjo dos sensores de temperatura.	76
Figura 37 –	Temperatura do adsorvente e do banho de água em função do tempo para um Fornecimento de energia térmica de 55MJ através de aquecedor elétrico.	77
Figura 38 –	Variação das temperaturas dentro da geladeira em função do tempo conforme o ciclo de aquecimento/ refrigeração.	78
Figura 39 –	Diagrama p-T-x para o ciclo de refrigeração por adsorção com a recuperação do calor sensível e de adsorção pelo banho de água para aquecimento de 55 MJ.	79
Figura 40 –	Teste de efeito frigorífico da geladeira	79
Figura 41 –	Diagrama p-T-x para o ciclo de refrigeração por adsorção com recuperação do calor sensível e de adsorção pelo banho de água para aquecimentos de 50 MJ (parte a) e 40 MJ (parte b).	80
Figura 42 –	Radiação solar mensal média para São Paulo e Xangai	81

Figura 43 –	Esquema do sistema híbrido de aquecimento e refrigeração modificado	87
Figura 44 –	Detalhes do processo de troca de calor e condensação do metanol no tanque de condensação	95
Figura 45 –	Diagrama esquemático de um sistema de refrigeração por adsorção de estágio único	117
Figura 46 –	Diagrama de pressão-temperatura-concentração do ciclo de adsorção com FCA FX-400/metanol	120
Figura 47 –	Medidas do equilíbrio de adsorção para os pares adsortivos FX-400/metanol e FK-1000/metanol	121
Figura 48 –	Diagrama pressão-temperatura–concentração (p-T-q) do sistema simulado	121
Figura 49 –	Resultados experimentais do sistema de adsorção para FCA FX-400/metanol	126
Figura 50 –	Resultados experimentais do sistema de adssorção para FCA KF-1000/metanol	127
Figura 51 –	Esquema construtivo do tubo do adsorvedor com canal de transferência de massa central	131
Figura 52 –	Detalhe de montagem do tubo do adsorvedor com canal de transferência de massa central	131
Quadro 1 –	Diferenças entre fisissorção e quimissorção	42

## Lista de Tabelas

Tabela 1 –	Composição setorial do consumo de eletricidade	17
Tabela 2 –	Tecnologias existentes de refrigeração acionadas por energia solar	37
Tabela 3 –	Possíveis combinações de adsorventes/adsorvatos para ciclos de adsorção	41
Tabela 4 –	Sistemas de refrigeração solar disponíveis para aplicações domésticas	51
Tabela 5 –	Parâmetros de simulação de um sistema híbrido de aquecimento de água e produção de gelo	72
Tabela 6 –	Resultados simulados anuais do sistema híbrido	73
Tabela 7 –	Resultados experimentais	74
Tabela 8 –	Radiação solar diária média mensal para Xangai e São Paulo	82
Tabela 9 –	Resumo dos indicadores de desempenho da tabela 7	94
Tabela 10 –	Resumo dos valores termodinâmicos das soluções	101
Tabela 11 –	Consumo de água quente por habitante	106
Tabela 12 –	Habitantes por unidade residencial unifamiliar	107
Tabela 13 –	Fator de ocupação	107
Tabela 14 –	Fator de Orientação	108
Tabela 15 –	Balanço energético	109
Tabela 16 –	Produção de energia necessária	110
Tabela 17 –	Propriedades termofísicas das FCAs FX-400 e KF-1000.	118
Tabela 18 –	Equações para cálculo das propriedades físicas	124
Tabela 19 –	Valores dos parâmetros utilizados para os cálculos com FCA	125

## Lista de Abreviaturas e Siglas

Abrava	Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento
AIE	Agência Internacional de Energia
CCP	concentrador de calha parabólica
Cepel	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
COP	coeficiente de desempenho
CPC	Concentrador Parabólico Composto
Cresesb	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
CTE	coletores solares de tubos evacuados
DC	corrente continua
GLP	Gás liqüefeito de petróleo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
JARN	<i>Japan Air Conditioning</i>
JRAIA	<i>Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association</i>
kW	kilowatt
Labsolar	Universidade Federal de Santa Catarina
OMS	Organização mundial da saúde
PEI	Programa Expandido de Imunização
Procel	Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica da Eletrobrás
Unicef	Fundo das Nações Unidas para a Infância

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	14
1.1 Energia elétrica	14
1.2 Energia solar	17
1.2.1 Aquecimento de água por energia solar	18
1.2.2 Refrigeração solar	21
<b>2 OBJETIVOS DO TRABALHO</b>	27
<b>3 CONCEITOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	28
3.1 Introdução	28
3.2 Sistemas de conversão de energia	28
3.2.1 Coletor solar de placas planas	29
3.2.2 Coletor solar de tubos evacuados	31
3.2.3 Coletor solar concentrador	33
3.3 Sistemas de refrigeração	35
3.3.1 Refrigeração por absorção	38
3.3.2 Refrigeração por adsorção	40
3.3.2.1 Sistema de refrigeração por adsorção sólida intermitente	42
3.3.2.2 Sistema de refrigeração por adsorção sólida contínuo	49
3.3.2.3 A refrigeração solar nas aplicações domésticas	51
3.4 Utilização de energia solar em ciclos combinados de aquecimento e refrigeração utilizando adsorção sólida	52
3.4.1 Trabalhos gerais	53
3.4.2 Estudo de caso	57
3.4.2.1 Descrição de funcionamento do sistema	58
3.4.2.2 Simulação de desempenho	71
3.4.2.3 Pesquisa experimental	73
<b>4 APLICAÇÃO A UM CASO PRÁTICO BRASILEIRO</b>	85
4.1 Alteração do sistema de condensação	85
4.1.1 Operação do sistema híbrido modificado	88
4.1.2 Cálculo do coeficiente de desempenho para o sistema híbrido modificado	91
4.2 Adaptação do sistema original às condições brasileiras	105
4.2.1 Consumo por habitante	106

4.2.2 Moradores por unidade habitacional	106
4.2.3 Fator de ocupação	107
4.2.4 Fator de orientação	108
4.2.5 Calculo da área de coletores solares	108
4.2.6 Determinação do leito de adsorvente	113
4.2.7 Determinação dos parâmetros de desempenho	114
4.3 Alteração do adsorvente.	115
4.3.1 Análise Teórica	117
4.3.2 Equações básicas	122
4.3.3 Resultados e conclusões sobre a viabilidade da aplicação da FCA para o ciclo misto de aquecimento e refrigeração	125
4.3.4 Adaptação para o caso brasileiro	128
4.4 Alteração do sistema de transferência de massa	129
<b>5 CONCLUSÕES SOBRE O TRABALHO DE PESQUISA</b>	132
<b>REFERÊNCIAS</b>	135
<b>Apêndice A – Parâmetros termodinâmicos</b>	141



## 5 CONCLUSÕES SOBRE O TRABALHO DE PESQUISA

A literatura, principalmente aquela publicada no Balanço Energético Nacional, é pródiga em informações sobre o consumo de energia elétrica no Brasil, permitindo estimar o quanto dessa energia é utilizada para aquecimento de água de banhos e em refrigeração doméstica; com algumas hipóteses, é possível estimar que 15,62% de toda a energia elétrica produzida no país é utilizada para o aquecimento de água para fins sanitários e para refrigeração no âmbito doméstico.

Energia solar é comumente utilizada para a produção de água quente; a literatura consultada na revisão bibliográfica indica a existência de vários trabalhos apresentando a conversão da energia solar também para a produção de resfriamento;

A literatura apresenta vários sistemas que permitem a conversão de energia solar em resfriamento; dentre os principais, encontram-se os sistemas de sorção; os sistemas de adsorção apresentam vantagens para uso no aquecimento e resfriamento combinados a partir da energia solar:

- a) faixa de temperaturas desejadas no aquecimento (80 a 100 °C) e no;
- b) resfriamento (próximo a 0 °C); os sistemas a absorção exigiriam maiores;
- c) temperaturas de aquecimento, o que, por sua vez, demandaria outros tipos;
- d) de coletores solares, mais custosos e complexos do que o de tipo plano;
- e) (tais coletores, não planos, também não aproveitam convenientemente a energia solar difusa).

A literatura pesquisada apresentou um trabalho importante, desenvolvido na Universidade Xangai Jiao Tong (WANG et al., 1999) no qual um sistema de adsorção que produzia o aquecimento de água para banho e o resfriamento, com geração de gelo em câmara isolada para conservação de produtos perecíveis (refrigerador); em tal trabalho, os pesquisadores chineses, ao invés de coletores solares, utilizaram resistências elétricas para emular coletores solares a vácuo; realizaram vários experimentos e publicaram os resultados, os quais serviram de referência para muitas das análises e proposições do presente trabalho.

A posição geográfica privilegiada do Brasil torna o sistema híbrido de aquecimento e resfriamento por adsorção utilizando energia solar vantajoso economicamente com

maior produção anual de efeito frigorífico e menor custo inicial do sistema pela redução do tamanho do sistema de captação de energia (coletores solares).

O ciclo de refrigeração por adsorção permite a utilização de fontes térmicas de baixa temperatura o que o torna ideal para ser utilizado com a energia solar permitindo o uso de coletores solares de placas planas já produzidos no Brasil em escala industrial, bastando a introdução de pequenas modificações com o propósito de melhorar sua eficiência.

O trabalho dos pesquisadores chineses utiliza um sistema intermitente de baixo custo, cujo ciclo coincide com o ciclo diário de insolação (coletor solar é aquecido durante o dia e o efeito de resfriamento é conseguido à noite, quando água fria é utilizada para abaixar a temperatura do leito de adsorção); tal característica foi aproveitada para aplicação ao projeto conceitual proposto para o Brasil neste trabalho.

Foi desenvolvido um modelo matemático simplificado que permite avaliar o desempenho energético do sistema; utilizando este modelo, foi possível estimar os seguintes resultados de desempenho:

- a) No trabalho dos pesquisadores chineses, embora o aquecimento tenha sido feito com resistências elétricas, é possível calcular que a área de coleta solar deveria ser de  $11 \text{ m}^2$ ; isso permitiria produzir 120 litros de água quente a cerca de  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  e 9 kg de gelo;
- b) No sistema proposto neste trabalho, para uma mesma produção de gelo, seriam produzidos 131 litros de água quente a cerca de  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  com uma área de coleta solar de  $4,5 \text{ m}^2$ .

Visando o aumento de desempenho, foram propostas possíveis melhorias a serem eventualmente incorporadas ao projeto brasileiro:

- a) Aproveitamento da energia térmica de dessuperaquecimento e condensação do adsorvato (metanol): a simulação matemática permitiu estimar que essa medida propicia uma elevação de cerca de 7,7 % no aquecimento da água de banho, mantida a produção de gelo;
- b) Alteração do adsorvente, de carvão ativado em pó para fibra de carvão ativado em tecido (a fibra de carvão ativado adsorve de 2 a 3 vezes mais do que o carvão em pó, por unidade de massa de carvão ativado): em função da menor densidade da fibra em tecido, o volume do adsorvedor

seria maior, o que é uma desvantagem; em função principalmente da faixa de temperaturas na qual o sistema opera, o efeito específico de resfriamento com a fibra de carvão ativado é menos da metade daquilo que se obtém com o carvão ativado em pó, ou seja, o uso da fibra de carvão ativado só apresenta resultados negativos para esta aplicação específica;

- c) Alteração da geometria de empacotamento do leito: foi calculado o aumento requerido de comprimento de tubos; para calcular o tempo de diminuição do ciclo seria necessário introduzir informações sobre a transferência de massa no leito, o que não era o objetivo principal deste trabalho; é um tema para desenvolvimento futuro.

O ciclo combinado de aquecimento e refrigeração apresenta tecnologia de construção simples e materiais facilmente encontrados na indústria brasileira. O único aspecto que requer maior cuidado é a manutenção do vácuo necessário no interior do sistema para que os processos de adsorção/dessorção ocorram.

O tema estudado é bastante interessante e oferece inúmeras oportunidades para desenvolvimentos futuros, cabendo destacar:

- a) aprimoramento do sistema de recuperação de energia da água do tanque 18, da figura 43;
- b) aprimoramento do circuito de transferência de fluidos entre os reservatórios, diminuindo o número de válvulas;
- c) estimativa de custos para implantação do sistema e sua viabilidade econômica;
- d) possibilidades de aprimoramento do sistema de isolamento térmico de tanques e tubulações;
- e) avaliação de possibilidade de elevação da eficiência dos coletores solares através do aprimoramento do sistema de isolamento térmico e uso de tintas seletivas na superfície de absorção.

## REFERÊNCIAS

ANYANWU, E. E.; OGUEKE, N. V. Thermodynamic design procedure for solid adsorption solar refrigerator. **Renewable Energy**, v.30, n.1, p.81-96, Jan. 2005.

APRICUS SOLAR WATER. **Informações gerais sobre energia solar**. Disponível em: <<http://www.apricus.com/index.htm>>. Acesso em: 20 jan. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15569: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto - Projeto e instalação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO. **Guia de parametrização da lei solar de São Paulo**. São Paulo: ABRAVA, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO – ABRAVA. **Informações gerais da homepage**. Disponível em: <<http://www.abrava.com.br/>>. Acesso em: 3 mar. 2001.

BOELMAN, E. C.; SAHA, B. B.; KASHIWAGI, T. Experimental investigation of a silicagel-water adsorption refrigeration cycle. **ASHRAE Transactions**, v.101, n.2, p.358-368, June1995.

CARDOZO, F. F. et al. **Conservação de energia e o uso de energias alternativas**. São Paulo: Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, 2005. (PCC 2540).

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. **Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica da Eletrobrás**. Brasília: Procel, 2007.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. **Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica da Eletrobrás**. Brasília: Procel, 2003.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Manual de conservação de energia elétrica; prédios públicos e comerciais**. Rio de Janeiro: PROCEL; 1988.

CIDADES SOLARES. **Aquecedor Solar reduz consumo de energia e água e preserva o meio ambiente**. 2008. Disponível em: <[http://www.cidadessolares.org.br/conteudo\\_view\\_print.php?id=306](http://www.cidadessolares.org.br/conteudo_view_print.php?id=306)>. Acesso em: 20 jan. 2009.

CRITOPH, R. E. Multiple bed regenerative adsorption cycle using the monolithic carbon–ammonia pair. **Applied Thermal Engineering**, v.22, n.6, p.667-677, Apr. 2002.

DAI, Y. J.; SUMATHY, K. Heat and mass transfer in the adsorbent of a solar adsorption cooling system with glass tube insulation. **Energy**, v.28, n.14, p.1511-1527, Nov. 2003.

DAVID, D. G. F. Desenvolvimento de superfícies opticamente seletivas e suas aplicações em painéis solares térmicos. In: WORKSHOP DA REDE MULTI-INSTITUCIONAL EM MATERIAIS AVANÇADOS E NANOTECNOLOGIA, 2., 2006. **Anais...** Salvador: LaPO-IF/UFBA, 2006. Disponível em: <<http://www.reman.ufba.br/talks2006/DenisDavid.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2009.

DORGAN, C. B.; STEVEN, P. L.; DORGAN, C. E. **Application guide for absorption cooling/refrigeration using recovered heat**. Atlanta: ASHRAE, 1995.

EI-MERRAOUI, M.; AOSHIMA, M.; KANEBO, K. Micropore size distribution of activated carbon fiber using the density functional theory and other methods. **Langmuir**, v.16, n.9, p. 4300–4304, 28 Mar. 2000.

EMPRESA BRASILEIRA DE INFRAESTRUTURA AEROPORTUÁRIA. **Relatório Ambiental 2005/2006 = Environmental report 2005/2006**. Brasília: INFRAERO, 2006. 44p. Disponível em: <<http://www.infraero.gov.br/upload/arquivos/inst/relatorio%20ambiental%202006.pdf>>. Acesso em: 25 jun. 2009.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2007 no base 2006**. Brasília: EPE, 2007. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/BEN2007\\_Cap01.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/BEN2007_Cap01.pdf)>. Acesso em: 20 jan. 2009.

FLÉCHON, J. et al. **Guid to solar refrigerators for remote areas and warm countries**. Paris: International Institute of Refrigeration, 1999.

GORDON, J. M.; NAG, K. C. High-efficiency solar cooling. **Solar Energy**, v.68, n.1, p. 23-31, 2000.

GRUPO FEITAL. **Catalogo da empresa**. Disponível em: <<http://www.feital.com.br/>>. Acesso em: 30 nov. 2009.

HAJJI, A.; WOREK, W. M.; LAVAN, Z. Dynamic analysis of a closed-cycle solar adsorption refrigerator using two adsorbent-adsorbate pairs. **ASME Journal of Solar Energy Engineering**, v.113, p.73-77, 1991.

HAMAMOTO, Y. et al. Study on the adsorption refrigeration cycle utilizing activated carbon fibers. Part 1: Adsorption characteristics of the activated carbon fiber. **International Journal of Refrigeration**, v.29, n.2, p.305-314, Mar. 2006a.

HAMAMOTO, Y. et al. Study on the adsorption refrigeration cycle utilizing activated carbon fibers. Part 2: Cycle performance evaluation. **International Journal of Refrigeration**, v.29, n.2, p. 315-327, Mar. 2006b.

HILDBRAN, C. et al. A new solar powered adsorption refrigerator with high performance. **Solar Energy**, v.77, n.3, p.311-318, Sept. 2004. Disponível em: <[http://www.lesbat.ch/files/articles/2004\\_A\\_new\\_solar\\_powered\\_adsorption\\_refrigerator\\_with\\_high\\_performance.pdf](http://www.lesbat.ch/files/articles/2004_A_new_solar_powered_adsorption_refrigerator_with_high_performance.pdf)>. Acesso em: 22 fev. 2009.

HU, E. J. Simulated results of a non-valve, daily-cycled, solar-powered carbon/methanol refrigerator with a tubular solar collector. **Applied Thermal Engineering**, v.16, n.5, p.439-445, 1996.

ILOEJE, O. C. Design, construction and test run of a solar powered solid absorption refrigerator. **Solar Energy**, v.35, p.447-452, 1985.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Informação gerais da homepage**. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/index.php>>. Acesso em: 20 fev. 2009.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Sistemas e equipamentos para aquecimento solar de água – edição 08/2008**. Rio de Janeiro: Inmetro. 2008.

INTERNATIONAL INSTITUTE OF REFRIGERATION. **Solar cooling on the rise**. Paris: International Institute of Refrigeration, 2006.

KANAMORI, M. et al. Production of cold heat energy by alcohol/activated carbon adsorption heat pump with a disk-module-type adsorber. **Journal of Chemical Engineering Japan**, v.30, n.3, p.434-439, 1997.

LAZZARIN, F. et al. **Guide to solar refrigerators for remote areas in warm countries**. Paris: International Institute of Refrigeration, 1999.

LEITE, A. P. F. et al. Tecnologia solar para produção de frio. In: SEMINÁRIO SERGIPANO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS, 1., 2006, Aracaju. **Apresentações...** Aracajú: UFPB, 2006.

LI, C. H.; WANG, R. Z; LU, Y. Z. Investigation of a novel combined cycle of solar powered adsorption ejection refrigeration system. **Renewable Energy**, v.26, n.4, p.611-622, Aug. 2002.

LI, M. et al. Development of no valve solar ice maker. **Applied Thermal Engineering**, v.24, n.5/6, p.865- 872, Apr. 2004.

LI, M. et al. Study on intermittent refrigeration phenomenon for solar solid adsorption refrigeration. **Applied Thermal Engineering**, v.25, n.11/12, p.1614-1622, Aug. 2005.

LI, M.; WANG, R. Z. Heat and mass transfer in a flat plate solar solid adsorption refrigeration ice maker. **Renewable Energy**, v.28, n.4, p.613-622, Apr. 2003.

LUCAS, L. IIR news. **International Journal of Refrigeration**, Paris, v.21, n.2, p.87-88, Mar. 1998.

MEYER, J. P. Solar cooling: a hot item for the future. **Sun & Wind Energy**, n.2, 2005.

MSPC - INFORMAÇÕES TÉCNICAS. **Dispositivos de efeito Peltier**. Disponível em: <<http://www.mspc.eng.br/electrn/im01/peltier101.gif>>. Acesso em: 12 abr. 2009.

MSPC - INFORMAÇÕES TÉCNICAS. **Refrigeração I: ciclo, fluido, processo de compressão**. Disponível em: <[http://www.mspc.eng.br/fldetc/refrig\\_120.shtml](http://www.mspc.eng.br/fldetc/refrig_120.shtml)>. Acesso em: 20 jan. 2010.

NADER, M. M. **Sustentabilidade na construção**: nem Flinstones, nem Jetsons. Disponível em: <<http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=23&Cod=355>>. Acesso em: 2 jan. 2009.

OERTEL, K.; FISCHER, M. Adsorption cooling system for cold storage using methanol/silicagel. **Applied Thermal Engineering**, v.18, n.9/10, p.773-786, 1998.

PANESI, A. R. Q. **Refrigeração e ar condicionado**. São Paulo: Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de São Paulo, 1999. (Curso de extensão).

PONS, M. et al. **Presentation of some adsorption units developed for solar refrigeration**. Paris: LIMSI, 2007. Disponível em: <<http://www.limsi.fr/Individu/mpons/solaradsor.htm>>. Acesso em: 20 jan. 2009.

PONS, M.; GRENIER, P. H. Experimental data on a solar powered ice maker using activated carbon and methanol adsorption pair. **ASME Journal of Solar Energy Engineering**, v.109, n.4, p.303-310, Nov. 1987.

PONS, M.; GUILLEMINOT, J. J. Design of a solar powered solid adsorption ice maker. **ASME Journal of Solar Energy Engineering**, v.108, n.4, p.332-337, 1986.

PRIDASAWAS, W. **Solar driven refrigeration systems with focus on the ejector cycle**. Thesis (Doctoral) – Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, 2006.

PRIDASAWAS, W.; LUNDQVIST, P. Technical options for a solar-driven cooling system. In: INTERNATIONAL SOLAR ENERGY CONGRESS 2003, Gothenburg. **Proceeding...** Freiburg: ISES, 2003.

SAHA, B. B.; BOELMAN, E. C.; KASHIWAGI, T. Computer simulation of a silica gel-water adsorption refrigeration cycle – the influence of operating conditions on cooling output and COP. **ASHRAE Transactions**, v.101, n.2, p.348-355, 1995.

SÃO PAULO (Cidade). Decreto n.º 49.148, de 21 de janeiro de 2008. Regulamenta a Lei n.º 14.459, de 3 de julho de 2007, que acrescenta o item 9.3.5 à Seção 9.3 - Instalações Prediais do Anexo I da Lei nº 11.228, de 25 de junho de 1992 (Código de Obras e Edificações), e dispõe sobre a instalação de sistema de aquecimento de água por energia solar nas novas edificações do Município de São Paulo. **Diário Oficial do Município**, São Paulo, 22 jan. 2008.

SCHMIDT, R. **Solar cooling**. Disponível em: <[http://www.zeotechde/e\\_index.htm](http://www.zeotechde/e_index.htm)>. Acesso em: 24 out. 2005.

SMALLWOOD, I. M. **Handbook of organic solvent properties**. London: Arnold, 1996.

SOLAR WATER HEATER. Wind Turbine Generator. **Informações gerais sobre energia solar**. Disponível em: <<http://www.solar.net.cn/>>. Acesso em: 20 jan. 2009.

SOLETROL AQUECEDORES SOLARES. **Catalogo eletrônico do fabricante**. Disponível em: <<http://www.soletrol.com.br/catalogos/>>. Acesso em: 20 jan. 2009.

SRIVASTAVA, N. C.; EAMES, I. W. A review of adsorbents and adsorbates in solid-vapour adsorption heat pump systems. **Applied Thermal Engineering**, v.18, n.9/10, p.707–714, 1998.

SUMATHY, K. **Performance of a no-valve solar adsorption ice maker**. Freiburg: Eurosun, 2004.

SUZUKI, M. Activated carbon fiber: fundamentals and applications. **Carbon**, v.32, n. 4, p.577-586, 1994.

TCHERNEV, D. **The Zeopower Company**. Disponível em: <<http://www.ees.nmt.edu/Zeolite06/invspeakers.php>>. Acesso em: 12 dez. 2006.

THERMO/SOLAR ŽIAR. **Catalogo eletrônico da empresa**. Disponível em: <<http://www.thermosolar.sk/aa-braz.htm>>. Acesso em: 20 jan. 2009.

THEVENOT, R. **A history of refrigeration throughout the world**. Paris: International Institute of Refrigeration, 1979.

THUMAUTOK, P.; WONGSUWAN, W.; KIATSIRIROAT, T. **Performance analysis of a solar adsorption heating and cooling system**. Tailândia: Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, 2004. (Technical Paper).

TIANSUWAN, J.; HIRUNLABH, J.; KIATSIRIROAT, T. Mathematical model of an activated carbon-ethanol refrigerator. **Thammasat International Journal of Science and Technology**, v.3, n.1, p. 66-71, Jan. 1998.

UNIVERSIDADE DO RIO GRANDE DO SUL. **Programa Radiasol**. Disponível em: <<http://www.mecanica.ufrgs.br/ftp.htm>>. Acesso em: 20 fev. 2009.

US DEPARTMENT OF ENERGY. **Solar Energy Technologies Program**. Disponível em: <<http://www1.eere.energy.gov/solar/>>. Acesso em: 12 mar. 2009.

VASILIEV, L. L. Solar sorption refrigerators with dual sources of energy. In: INTERNATIONAL SORPTION HEAT PUMP CONFERENCES, 2., 2002, Shanghai, China, **Proceedings...** Shanghai: ISHPC, 2002. p.26-33.

VASILIEV, L. L. et al. Solar-gas solid adsorption heat pump. **Applied Thermal Engineering**, v.21, n.5, p. 573-583, Apr. 2001.

WANG, R. Z. et al. A new hybrid system of solar powered water heater and adsorption ice maker. **Solar Energy**, v.68, n.2, p.189-195, Feb. 2000.

WANG, R. Z. et al. **Research on a combined cycle of heating and cooling with solid adsorption implementation**. Shanghai: Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, 1999.

WANG, R. Z. et al. Study on a new solid adsorption refrigeration pair: active carbon fiber-metanol. **Journal Solar Energy Engineering Transactions of ASME**, v.119, n.3, p.214-218, Aug. 1997.



WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Solar energy and rural health care, Fact Sheet N132**. Disponível em: <<http://www.int/inffs-en-fact132.html>>. Acesso em: 12 mar. 2001.

ZHANG, X. J.; WANG, R. Z. Design and performance simulation of a new solar continuous solid adsorption refrigeration and heating hybrid system. **Renewable Energy**, v.27, n.3, p.401-415, Nov. 2002.